

УДК 674.08

С. С. Утгоф, аспирант (БГТУ); Л. В. Игнатович, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УПЛОТНЕННОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ И ОЛЬХИ

Статья посвящена моделированию технологического процесса уплотнения древесины, что позволяет сократить затраты на поиск рациональных технологических режимов получения древесины с улучшенными физико-механическими характеристиками. Материал статьи основан на статистическом анализе результатов эксперимента по уплотнению древесины мягких лиственных пород. В ходе исследования были определены физико-механические характеристики уплотненной древесины: твердость, износостойкость и степень уплотнения, и получены зависимости данных характеристик от технологических факторов.

The article describes the modeling of deciduous wood compaction process, thereby reducing the cost of finding rational technological regimes of wood with improved physical and mechanical properties. The material is based on a statistical analysis of the experimental results on deciduous wood compaction process. The study determined the physical and mechanical characteristics of compacted wood hardness, wear resistance and degree of compaction and these characteristics are obtained depending on technological factors.

Введение. Многочисленные исследования показывают, что наиболее прогрессивным методом прогнозирования свойств получаемых материалов является математическое моделирование технологического процесса. Важными достоинствами такого подхода являются возможности многократного сокращения объема сложных и трудоемких экспериментальных исследований и простого варьирования значений технологических факторов. Полученные в результате моделирования данные о влиянии технологических факторов на свойства уплотненной древесины являются основой для разработки технологического процесса получения уплотненной древесины с заданными свойствами.

Основная часть. Прочность древесины всех пород можно повысить путем ее уплотнения, то есть за счет увеличения количества древесного вещества в единице объема, если это уплотнение не будет связано с разрушением клеток древесины. Древесина любой породы способна деформироваться под действием сил. Следовательно, основным технологическим фактором в технологическом процессе уплотнения является усилие – давление уплотнения.

Наибольшую податливость древесины уплотнению следует ожидать при температуре 90–100°C и влажности 25–30% [1]. Древесина в таком состоянии оказывает наименьшее сопротивление воздействию давления, в результате значительного размягчения наполнителя целлюлозного скелета уплотнение древесины происходит с минимальными микроразрушениями. Однако повышенная влажность древесины усложняет технологический процесс, т. к. необходимы дополнительные энергозатраты на сушку

уплотненной древесины до эксплуатационной влажности $10 \pm 2\%$, что приведет к существенному увеличению продолжительности технологического процесса. В ходе ранее проведенных исследований [2] было установлено, что пластификация древесины за счет перехода лигнина в более термостабильное состояние, первичная конденсация связей после размягчения лигнина происходят при температуре 90–100°C. На температуру размягчения лигнинов влияет присутствие влаги. Вода оказывает на лигнин пластифицирующее действие и снижает температуру размягчения (до 80–30°C). Однако этот эффект вызывается лишь небольшим количеством воды. Так, при влагосодержании около 2% температура размягчения природного лигнина снижается до 115°C. Дальнейшее повышение влагосодержания не снижает температуру размягчения [3]. Учитывая вышесказанное, принимаем влажность древесины равной эксплуатационной $10 \pm 2\%$.

Древесина представляет собой комплекс компонентов полимерной природы, основными из которых являются целлюлоза (35–50%) и лигнин (18–35%). По своим физическим свойствам целлюлоза и лигнин резко различаются: целлюлоза характеризуется эластичностью и высокой прочностью на разрыв, лигнин, наоборот, хрупкостью и высоким сопротивлением на сжатие. Полимерные материалы обладают специфическими механическими свойствами, среди которых деформируемость является важнейшей инженерной характеристикой [4].

Впервые деформация древесины была описана Ю. М. Ивановым как деформация упруго-вязкого тела. В этом случае в любой момент общая деформация будет складываться из упругой и пластической:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n,$$

где ε – общая деформация; ε_y – упругая деформация; ε_n – пластическая деформация.

В ряде работ деформация полимеров при различных температурах представлена в другой форме [5, 6, 7, 8]. В стеклообразном состоянии наблюдается только упругая деформация $\varepsilon_{уп}$ с высоким модулем упругости ($E = 2,2 \cdot 10^3 - 5,0 \cdot 10^3$ Па). Такая деформация связана с изменением средних межатомных и межмолекулярных расстояний в полимере, а также с деформацией валентных углов макромолекул. Выше температуры стеклования к этой деформации добавляется высокоэластичная составляющая $\varepsilon_{вэл}$, которая превосходит упругую составляющую в тысячи раз и характеризуется модулем высокоэластичности $E = 0,1-1$ МПа. Выше температуры текучести проявляется еще одна составляющая деформации – вязкая $\varepsilon_{вяз}$, которая приводит к постепенному накоплению остаточной деформации образца. То есть, в общем случае деформация полимера состоит из трех частей, каждая из которых играет различную роль при низких и высоких температурах.

$$\varepsilon = \varepsilon_{уп} + \varepsilon_{вэл} + \varepsilon_{вяз}.$$

Природный лигнин в древесине при нагревании размягчается и переходит из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластичное (а иногда и в вязкотекучее). При понижении температуры лигнин переходит в более термостабильное состояние, что обеспечивает формоустойчивость уплотненной древесины.

В ходе анализа основных факторов, влияющих на процесс уплотнения древесины, были выявлены особенности, которые позволяют сократить количество основных исследуемых факторов до трех: давление уплотнения, температура плит пресса и время уплотнения. Время уплотнения является важным технологическим параметром, т. к. для определения влияния температуры уплотнения на образец определенной толщины необходимо контролировать длительность ее воздействия.

Принимаем следующие значения переменных факторов: давление уплотнения 9,8–19,6 МПа, температура плит пресса 70–110°C и время уплотнения 1–3 мин.

Для оценки изменения физико-механических характеристик уплотненной древесины принимаем следующие контролируемые выходные параметры: степень уплотнения, твердость и износостойкость древесины.

Уплотненная древесина обладает более высокими физико-механическими показателями, чем натуральная, при этом в процессе уплотнения

не применяются химические составы, а улучшение свойств происходит только под воздействием высоких температур и давления.

Целью экспериментального исследования являлось получение зависимостей физико-механических характеристик уплотненной древесины от технологических факторов уплотнения и разработка режимов получения материала, равноценного по своим свойствам древесине твердых лиственных пород.

Для проведения испытаний были выбраны наиболее распространенные на территории Республики Беларусь мягкие лиственные породы древесины: береза (22,6%) и ольха (8,4%).

Основные виды березы относятся к породам средней плотности. Их средняя плотность (при 12% влажности) – 640 кг/м³. Береза хорошо поддается гнутью и другим видам обработки, легко поддается имитации под ценные породы. Применение березы для строительных деталей ограничено из-за ее склонности к короблению.

Ольха относится к породам малой плотности. Среднее значение плотности древесины ольхи при стандартной влажности (12%) – 525 кг/м³. Древесина ольхи мягкая, легкая, хорошо режется, мало коробится при сушке, обладает хорошей формоустойчивостью. Для уплотнения были изготовлены образцы 100×100 мм и толщиной 6 мм, плотность образцов соответствует среднему показателю.

Уплотнение древесины поперек волокон проводили на гидравлическом прессу ПСУ-50. Твердость образцов определяли в соответствии с ГОСТ 16483.17-81 [9], износостойкость – на абразиметре Табера по разработанной методике.

Для планирования эксперимента использовался план Бокса. Матрицы планирования в кодированном и натуральном выражении и результаты эксперимента приведены в таблице.

В таблице указаны величины среднего значения параллельных опытов. На основе экспериментальных данных были определены регрессионные зависимости функций отклика от независимых факторов. В результате расчетов получены уравнения регрессии второго порядка в кодированных и натуральных обозначениях, учитывающие влияние каждого технологического фактора на величину твердости, степени уплотнения и износостойкости.

Проверка уравнения регрессии с использованием критерия Фишера подтвердила адекватность данных моделей [10]. Полученные математические модели позволяют выбрать рациональный технологический режим в зависимости от требований, предъявляемых к получаемому материалу, и прогнозировать свойства уплотненной древесины при различных сочетаниях переменных факторов.

**Матрица планирования в кодированном и натуральном выражении,
результаты эксперимента по уплотнению древесины**

№ режима	Кодированная матрица эксперимента			Матрица эксперимента в натуральном выражении			Результаты эксперимента для древесины березы			Результаты эксперимента для древесины ольхи		
	X_1	X_2	X_3	P , МПа	T , °C	t , мин	Y_1 , %	Y_2 , МПа	Y_3 , г	Y_1 , %	Y_2 , МПа	Y_3 , г
1	1	1	1	19,6	110	3	39,8	54,5	0,147	48,9	59,1	0,116
2	-1	1	1	9,8	110	3	31,8	46,8	0,185	43,3	43,6	0,136
3	1	-1	1	19,6	70	3	35,9	45,3	0,163	42,6	52,9	0,157
4	-1	-1	1	9,8	70	3	22,5	38,8	0,211	40,1	32,9	0,177
5	1	1	-1	19,6	110	1	34,9	45,9	0,207	45,8	48,8	0,156
6	-1	1	-1	9,8	110	1	27,2	40,4	0,222	42,0	38,3	0,166
7	1	-1	-1	19,6	70	1	34,6	45,8	0,226	38,1	36,5	0,200
8	-1	-1	-1	9,8	70	1	20,4	39,6	0,251	36,4	32,5	0,202
9	1	0	0	19,6	90	2	35,6	45,1	0,175	44,9	59,4	0,155
10	-1	0	0	9,8	90	2	22,8	38,7	0,212	41,2	50,7	0,168
11	0	1	0	14,7	110	2	30,7	42,7	0,189	44,5	58,7	0,128
12	0	-1	0	14,7	70	2	25,8	39,7	0,211	39,9	52,3	0,173
13	0	0	1	14,7	90	3	30,0	43,4	0,212	43,8	56,1	0,153
14	0	0	-1	14,7	90	1	26,3	40,8	0,276	40,1	47,6	0,195

В кодированных обозначениях полученные зависимости имеют следующий вид.

Величина значения степени упрессовки древесины березы

$$Y_1^B = 27,356 + 5,61 \cdot x_1 + 2,52 \cdot x_2 + 1,66 \cdot x_3 - 1,487 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,063 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,763 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,844 \cdot x_1^2 + 0,894 \cdot x_2^2 + 0,794 \cdot x_3^2.$$

Величина значения степени упрессовки древесины ольхи

$$Y_1^O = 42,525 + 1,73 \cdot x_1 + 2,74 \cdot x_2 + 1,63 \cdot x_3 + 0,65 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,325 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,475 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,525 \cdot x_1^2 - 0,325 \cdot x_2^2 - 0,575 \cdot x_3^2.$$

Величина значения твердости древесины березы

$$Y_2^B = 40,281 + 3,23 \cdot x_1 + 2,11 \cdot x_2 + 1,63 \cdot x_3 + 0,063 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,313 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,038 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,619 \cdot x_1^2 + 0,919 \cdot x_2^2 + 1,819 \cdot x_3^2.$$

Величина значения твердости древесины ольхи

$$Y_2^O = 59,847 + 6,14 \cdot x_1 + 4,406 \cdot x_2 + 4,36 \cdot x_3 - 0,084 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2,281 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,499 \cdot x_2 \cdot x_3 - 4,782 \cdot x_1^2 - 4,332 \cdot x_2^2 - 7,992 \cdot x_3^2.$$

Величина значения износостойкости древесины березы

$$Y_3^B = 0,218 - 0,0163 \cdot x_1 - 0,0112 \cdot x_2 -$$

$$- 0,0264 \cdot x_3 + 0,0025 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,00575 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,00075 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0245 \cdot x_1^2 - 0,018 \cdot x_2^2 + 0,026 \cdot x_3^2.$$

Величина значения износостойкости древесины ольхи

$$Y_3^O = 0,139 + 0,0065 \cdot x_1 + 0,0207 \cdot x_2 + 0,018 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0035 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0003 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0004 \cdot x_1^2 + 0,0106 \cdot x_2^2 - 0,0129 \cdot x_3^2.$$

В натуральном выражении величина значения степени упрессовки древесины березы

$$Y_{1H}^B = 20,14 + 0,279 \cdot P - 0,129 \cdot T - 4,759 \cdot t - 0,015 \cdot P \cdot T - 0,013 \cdot P \cdot t + 0,038 \cdot T \cdot t + 0,077 \cdot P^2 + 0,002 \cdot T^2 + 0,794 \cdot t^2.$$

Величина значения степени упрессовки древесины ольхи:

$$Y_{1H}^O = 24,039 - 1,019 \cdot P + 0,233 \cdot T + 5,093 \cdot t + 0,007 \cdot P \cdot T + 0,066 \cdot P \cdot t - 0,024 \cdot T \cdot t + 0,022 \cdot P^2 - 0,001 \cdot T^2 - 0,575 \cdot t^2.$$

Величина значения твердости древесины березы:

$$Y_{2H}^B = 79,341 - 1,508 \cdot P - 0,521 \cdot T - 15,751 \cdot t + 0,0006 \cdot P \cdot T + 0,0638 \cdot P \cdot t + 0,102 \cdot T \cdot t + 0,067 \cdot P^2 + 0,0023 \cdot T^2 + 1,8188 \cdot t^2.$$

Величина значения твердости древесины ольхи:

$$Y_{\text{тн}}^{\text{о}} = -141,777 + 6,254 \cdot P + 2,232 \cdot T + 31,728 \cdot t - 0,001 \cdot P \cdot T + 0,466 \cdot P \cdot t - 0,025 \cdot T \cdot t - 0,199 \cdot P^2 - 0,011 \cdot T^2 - 7,992 \cdot t^2.$$

Величина значения износостойкости древесины березы:

$$Y_{\text{зн}}^{\text{б}} = -0,105 + 0,027 \cdot P + 0,007 \cdot T - 0,116 \cdot t + 0,00003 \cdot P \cdot T - 0,00117 \cdot P \cdot t + 0,0000375 \times T \cdot t - 0,001 \cdot P^2 - 0,00005 \cdot T^2 + 0,026 \cdot t^2.$$

Величина значения износостойкости древесины ольхи:

$$Y_{\text{зн}}^{\text{о}} = 0,113 + 0,00056 \cdot P + 0,00392 \cdot T - 0,0579 \times t - 0,00001 \cdot P \cdot T - 0,00071 \cdot P \cdot t - 0,00001 \times T \cdot t + 0,00002 \cdot P^2 - 0,00003 \cdot T^2 + 0,013 \cdot t^2.$$

На основе полученных моделей были построены поверхности отклика степени уплотнения, твердости и износостойкости древесины березы и ольхи. На рис. 1 представлены уровни поверхностей отклика математических моделей степени уплотнения древесины ольхи и березы при фиксированном значении давления 19,6 МПа. На рис. 2 представлены уровни поверхностей отклика математических моделей твердости и износостойкости древесины ольхи и березы при фиксированном значении давления 19,6 МПа.

Очевидно, что характер зависимостей для одних и тех же показателей у уплотненной древесины ольхи и березы аналогичен.

При анализе полученных поверхностей отклика следует отметить, что в изучаемом диапазоне переменных факторов только одна зависимость принимает оптимальное значение – зависимость твердости уплотненной древесины ольхи от технологического режима. Функция, описывающая зависимость твердости уплотненной древесины ольхи от давления, времени и температуры уплотнения достигает максимума при значениях: давление $P = 18,27$ МПа, температура плит пресса $t = 98,1$ С° и время уплотнения $T = 2,37$ мин.

Для поиска оптимума степени уплотнения и твердости уплотненной древесины березы необходимо проводить дополнительные исследования с расширением диапазона переменных факторов, что является нецелесообразным, т. к. предлагаемый диапазон температур и давления уплотнения выбран с учетом энергозатрат.

В случае с зависимостью степени уплотнения от режима оптимальным значением является режим, при котором значение плотности уплотненной древесины достигнет значения плотности древесинного вещества 1560 кг/м³. Целью исследования была разработка режимов получения материала, равноценного древесине твердых лиственных пород (дуб, ясень), плотность которых 690–750 кг/м³, что было достигнуто, дальнейшее уплотнение древесины является нецелесообразным.

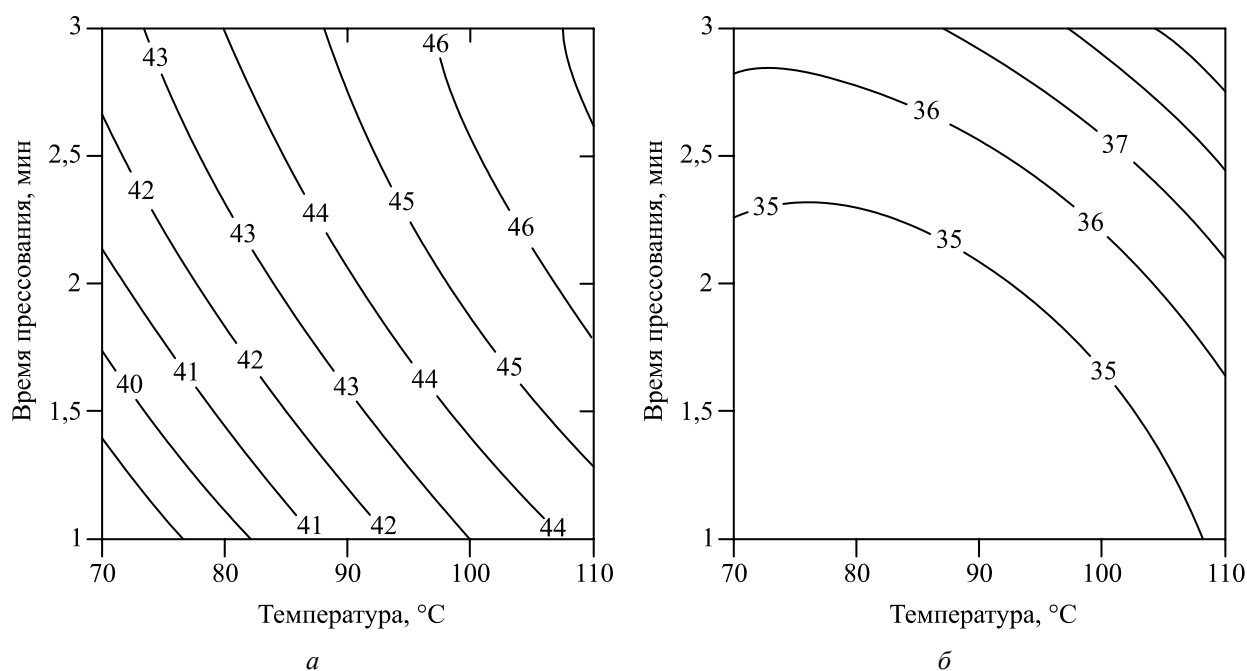


Рис. 1. Зависимости степени уплотнения от температуры уплотнения и времени при фиксированном значении давления $P = 19,6$ МПа:
а – ольхи; б – березы

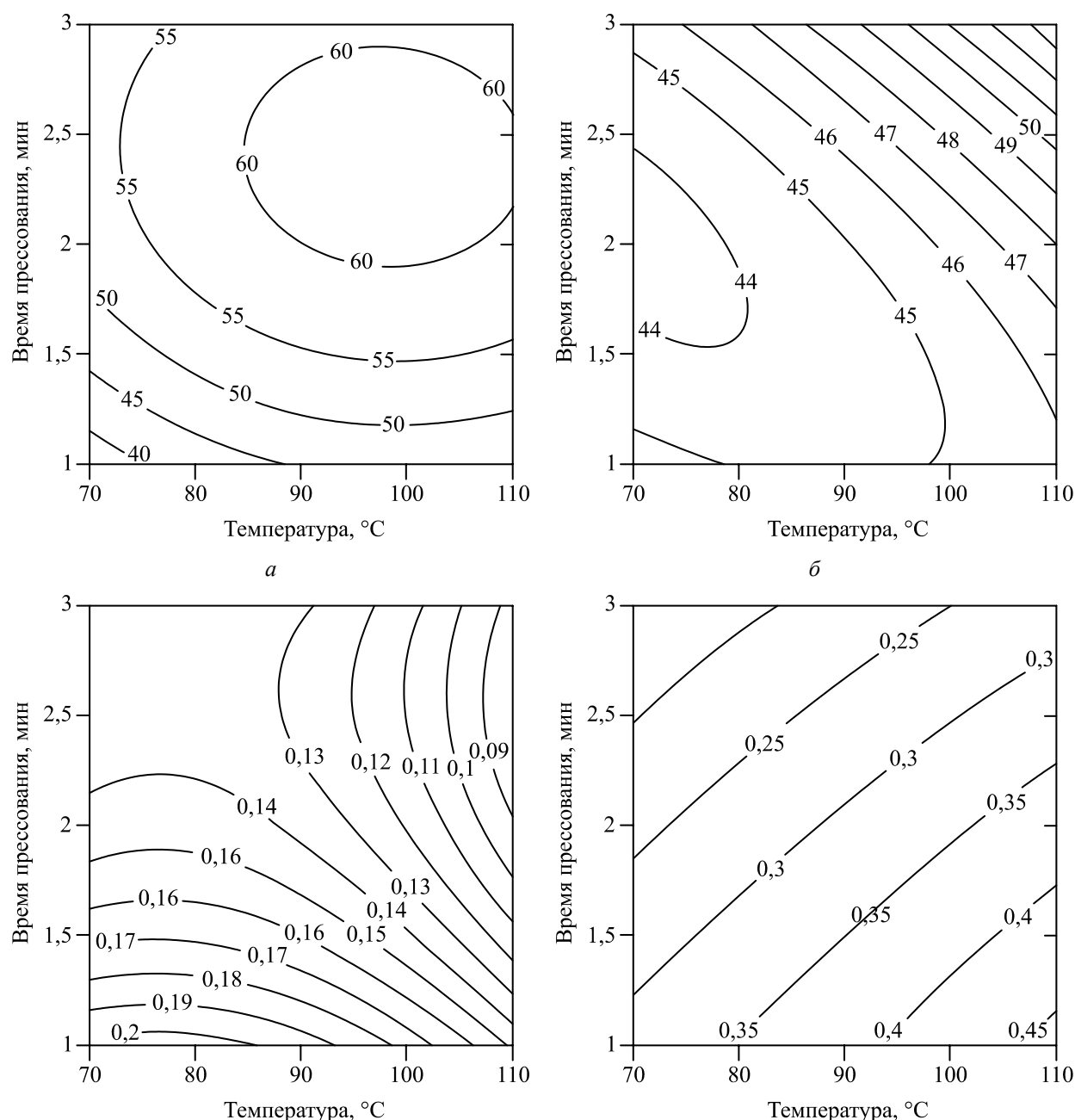


Рис. 2. Зависимости твердости и износостойкости уплотненной древесины от температуры уплотнения и времени при фиксированном значении давления $P = 19,6$ МПа:
а, в – ольхи; б, г – березы

Используя полученные математические модели, определяем зависимость степени уплотнения от давления уплотнения при оптимальной температуре 100°C и различном времени уплотнения 1–3 мин. Полученные зависимости имеют следующий вид (рис. 3):

$$\varepsilon_1 = 39,457 - 0,253 \cdot P + 0,022 \cdot P^2;$$

$$\varepsilon_2 = 40,425 - 0,0187 \cdot P + 0,022 \cdot P^2;$$

$$\varepsilon_3 = 40,243 - 0,121 \cdot P + 0,022 \cdot P^2.$$

Характер зависимости степени уплотнения от давления (усилия) уплотнения соответствует

характеру 3-й фазы деформации зависимости деформация – напряжение [1]. Данной фазе прессования соответствуют максимальные остаточные деформации, что свидетельствует о необратимости изменений формы древесины.

Анализ полученных результатов исследования показывает, что уплотнение древесины по выбранным режимам приводит к значительному увеличению ее плотности: 36,4–48,9% для древесины ольхи и 22,4–39,8% для древесины березы. Значение тангенциальной твердости древесины ольхи и березы составляет 32,5–59,1 Н/мм² и 39,6–54,5 Н/мм² соответственно.

Твердость уплотненной древесины березы и ольхи для некоторых режимов достигает и даже превышает значения твердости древесины дуба на 12,6–18,6%. Относительно первоначальной твердости значение твердости после уплотнения улучшилось максимально на 92–99%. Как для древесины ольхи, так и для древесины березы износостойкость улучшилась в 2 раза.

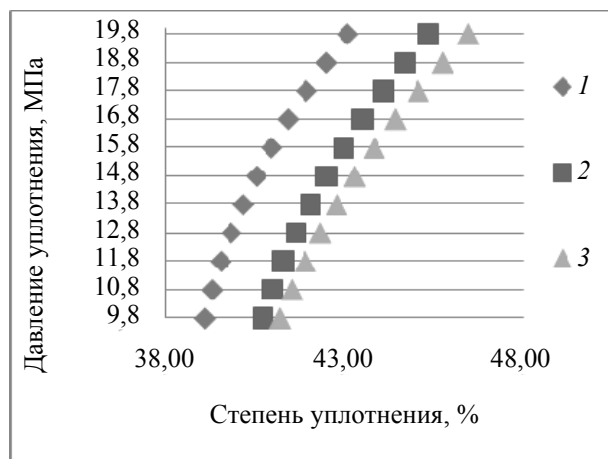


Рис. 3. Диаграмма давление уплотнения – степень уплотнения:

1 – время уплотнения 1 мин; 2 – 2 мин; 3 – 3 мин

При анализе полученных регрессионных зависимостей можно заметить, что при увеличении значений всех переменных факторов степень уплотнения древесины увеличивается, следовательно, улучшаются твердость и износостойкость.

Заключение. Полученные математические модели можно использовать для прогнозирования свойств получаемой уплотненной древесины и разработки рациональных режимов уплотнения древесины мягких лиственных пород с требуемыми характеристиками. Результаты исследования свидетельствуют о том, что уплотнение в большей степени улучшает свойства древесины ольхи, чем березы, т. к. береза изначально обладает более высокой плотностью, чем ольха, и, соответственно, в меньшей степени подвержена уплотнению.

Таким образом, для производства многослойных паркетных изделий в качестве лицевого слоя целесообразно применять уплотненную древесину мягких лиственных пород, т. к. в процессе уплотнения улучшаются твердость и износостойкость древесины. Полученные результаты являются основой для разработки рациональных режимов уплотнения древесины мягких лиственных пород в технологии многослойных паркетных покрытий с лицевым слоем из уплотненной древесины.

Литература

1. Хухрянский П. Н. Прессование древесины. Л.: Лесная промышленность, 1964. 351 с.
2. Утгоф С. С., Игнатович Л. В. Особенности структуры и свойств уплотненной древесины мягких лиственных пород // Весник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. 2013 г. № 3: Серия 6. Техника. С. 70–75.
3. Азаров В. И., Буров В. И., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2010. 624 с.
4. Камалова Н. С. Влияние слабых импульсных магнитных полей на механические и адсорбционные свойства модифицированной древесины: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Воронеж, 2008. 159 л.
5. Вундерлих Б. Физика макромолекул. Т. 2. М.: Мир, 1979. 574 с.
6. Марей А. И. Физические свойства эластомеров. Л.: Химия, 1975. 136 с.
7. Бартенев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров. Л.: Химия. 1990. 430 с.
8. Флори П. Статистическая механика цепных молекул. М.: Мир. 1971. 440 с.
9. Древесина. Метод определения статической твердости: ГОСТ 16483.17–81. Введ. 1983-01-01. М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1981. 5 с.
10. Пижурич А. А., Розенблит М. С. Исследования процессов деревообработки / М.: Лесная пром-сть, 1984. 232 с.

Поступила 25.02.2014